

基于 PC-104 plus PC 的红外图像处理系统的设计*

石 岩¹, 张天序¹, 江浩阳², 毛海岑¹

(1. 华中科技大学 图像识别与人工智能研究所, 湖北 武汉 430074;
2. 图像信息处理与智能控制教育部重点实验室, 湖北 武汉 430074)

摘 要:介绍了利用非制冷红外焦平面传感器,采用 PC-104 plus 嵌入式 PC 与 FPGA 技术构建的便携式红外图像处理系统。针对凝视型红外图像处理系统的两个技术问题——红外焦平面非均匀性校正的硬件实现和保证图像帧的完整性,本文结合所研制的系统进行了深入的阐述。利用本系统,针对应用背景可以构建诸如红外检测、红外跟踪等各种具体应用系统。

关键词:非制冷红外焦平面阵列; 非均匀性校正; PC-104 plus; PCI 总线; PCI 9054
中图分类号: TN215 **文献标识码:** A **文章编号:** 1007-2276(2004)05-0500-05

Design of an IR image processing system based on PC-104 plus PC*

SHI Yan¹, ZHANG Tian-xu¹, JIANG Hao-yang², MAO Hai-cen¹

(1. Institute for Pattern Recognition and Artificial Intelligence, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China; 2. Key Laboratory of Education Ministry for Image Processing and Intelligent Control, Huazhong University of Science and Technology Wuhan 430074, China)

Abstract: The design of a portable IR image processing system using PC-104 plus embedded PC, uncooled IRFPA and FPGA is introduced. In addition, the two main technique problems, two-points NUC algorithm implemented by hardware and ensurement of image frame integrity, are discussed. Furthermore, some application systems, such as IR image detecting system and IR image tracing system, can be realized based on this IR image processing system.

Key words: UIRFPA; Nonuniformity correction; PC-104 plus; PCI bus; PCI 9054

0 引 言

非制冷红外焦平面阵列(UIRFPA)具有成本低、体积小、功率低、结构紧凑等优点,在红外成像、红外探测和红外跟踪等领域有着广泛的应用前景。对于 UFPA 传感器输出进行 A/D 转换后,还需要进行非

均匀性校正等预处理工作。目前常用的方案是以 DSP 为核心,采用 FPGA 器件和专用显示电路来实现。这种系统存在开发周期长、代码移植工作量大、无法利用基于 PC 的丰富硬软件资源、缺乏良好人机界面等不足。

本文介绍了基于 PC-104 plus 的嵌入式 PC,利用 FPGA 和 PCI 9054 接口芯片实现的红外图像采集

收稿日期:2003-11-04; 修订日期:2004-01-05

* 基金项目:国家自然科学基金重点资助项目(60135020)

作者简介:石岩(1975-),男,湖南衡阳人,博士生,研究方向为图像处理、嵌入式实时操作系统和图像并行处理系统等方面。

和非均匀性校正的PCI接口/处理卡,最终实现了一个基于PC-104 plus硬件平台和Windows操作系统的实用红外图像处理系统。由于与标准台式PC(PC/AT)体系结构完全兼容,在硬件上可以方便地扩展诸如硬盘、键盘、USB设备和液晶屏等;软件上既简化了程序开发,又消除了代码移植工作。

1 系统的总体设计

随着1992年PC-104规范和IEEE P996.1标准的制定,使得PC-104成为既与标准台式PC(PC/AT)体系结构完全兼容,同时又具有高可靠性、小尺寸、低功耗的嵌入式PC,这就为传统的嵌入式微控制器提供了PC兼容的另一种选择。特别是1997年制定的PC-104 plus 1.1标准^[1],增加了一个120芯自插式的接插件支持PCI总线,在电气规范上完全采用PCI 2.1标准^[2]。由于PCI总线可以实现132 MB/s的数据传输速率,为外设扩展提供了高速通道,因此可以利用PC-104 plus主机构建一个嵌入式红外图像处理系统。

由于使用的UFPA输出图像数据速率为10 MB/s,采用ISA总线无法完成图像数据的高速传输,因此在设计时采用PC-104 plus的PCI总线部分完成数据传输。连接PCI总线的设备分为两类:主控设备和目标设备。主控设备可以控制总线驱动地址、数据和控制信号。目标设备不能启动总线操作,受主控设备控制从其中读取或向其传送数据。因此,系统中的非均匀性校正(NUC)卡选择目标设备工作模式即可满足功能要求。

为了满足PCI总线接口规范,本设计中选用PLX公司的PCI 9054专用接口芯片^[3]。PCI 9054是32 bit/33 MHz的通用PCI总线控制器专用芯片,符合PCI 2.2规范。突发传输速率达到132 MB/s。本地总线支持复用/非复用的32 bit地址/数据,可以工作于M、C、J三种模式,其中M模式是用来与Motorola的MPC850或MPC860处理器进行无缝连接的,C模式中地址总线 and 数据总线为非复用的,J模式则为复用的。本地总线时钟可以与PCI时钟异步,最高可工作频率为50 MHz,本地总线可以设定为8、16、32 bit三种宽度。根据系统实际工作情况,将本地总线设置为C模式,从而地址/数据复用的

PCI总线转化成易于使用的、非复用的本地总线,工作频率为33 MHz。由于原始图像数据和校正后图像数据分别是14 bit和16 bit,因此本地总线宽度设置为16 bit。

红外焦平面非均匀性校正采用常用的两点校正法。由于标准的两点校正法的校正系数为浮点数,而FPGA在处理浮点数对系统资源以及算法复杂度时要求都很高,因此在系统中通过对校正公式进行定点近似,将系数转换为定点数。具体实现方法参见第2.1节。最终设计的NUC预处理/接口卡由PCI 9054、FPGA以及图像双口缓存和存放校正系数的RAM等组成。系统框图如图1所示。

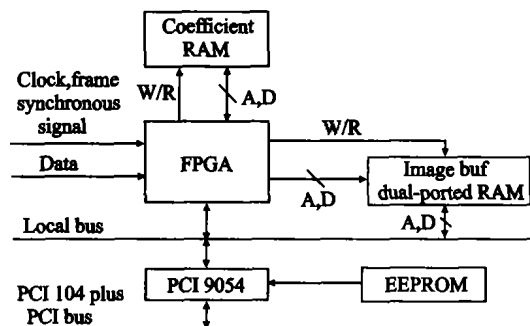


图1 NUC预处理/接口卡结构框图

Fig. 1 The structure of NUC pre-processing, interface card

系统的工作流程为:

在标定工作模式时,NUC卡将未校正的定标图像通过PCI总线传到PC-104 plus主机的系统内存。系统上层的应用软件根据定标数据,计算IRFPA各个光敏元的校正系数G和O,并将其存入硬盘中的数据文件,供系统以后使用。同时,系统上层应用软件也将校正系数写入存放校正系数的RAM,然后修改NUC卡上的状态命令寄存器,通知NUC卡转入到校正工作模式。

在校正工作模式时,NUC卡将输入图像数据经过非均匀性校正,再通过DMA方式传到PC主机系统内存。系统上层应用软件得到经过校正的图像数据后,再进行后续的检测或其他处理。

系统的工作流程框图如图2所示。根据系统工作流程的要求以及外围电路的设计,NUC卡上的FPGA内部设计有数据输入接口、NUC处理、外存读写控制、本地总线接口、工作模式状态机五个部分。其中NUC处理部分的详细设计见第2.1节。

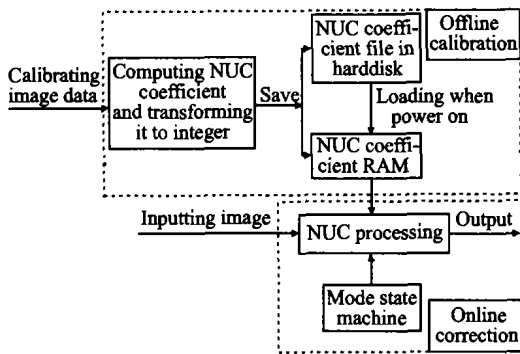


图2 系统的工作流程图

Fig. 2 Flowchart of operation of the system

用户通过软件修改 FPGA 内部的命令寄存器,控制 NUC 卡切换工作状态、请求上传图像数据。工作模式状态机则根据命令寄存器值,以及 IRFPA 的帧同步信息确定何时切换工作状态、何时启动 DMA 上传图像缓存中的图像数据。通过合理设计工作模式状态机,保证了上传到系统内存中的图像数据帧的完整性和处理的一致性,即所有的数据是属于同一帧图像的且都是经过相同处理的(都为原始图像数据或都为校正后的图像数据)。

2 设计中的若干关键问题

2.1 非均匀性校正两点法的硬件实现

焦平面器件应用至今,国际上已经提出了多种非均匀校正的方法。其中有的已经使用,有的正在理论探索和实验室研究阶段。主要分为两大类:基于场景的校正算法^[4,5]和基于标定的校正算法^[6]。而在实际的应用系统中,由于需要实时校正,所以大都采用标定校正算法中的两点校正法(或多点校正法)^[7,8]。两点校正算法只有乘加运算,不涉及逻辑判断、跳转等操作,便于采用硬件实现。FPGA 具有可编程的灵活性,非均匀校正模块作为图像处理过程的前端预处理模块在其中实现,可减轻处理器的负担。

两点校正法的运算公式为:

$$Y_{ij} = G_{ij}X_{ij} + O_{ij} \quad (1)$$

式中 X_{ij} 是点 (i, j) 输出的原始灰度值,为正整数; G_{ij} 和 O_{ij} 分别是点 (i, j) 对应的增益校正系数和偏移校正系数,均为浮点数, G_{ij} 和 O_{ij} 的计算公式为:

$$G_{ij} = [\langle X^{T_2} \rangle - \langle X^{T_1} \rangle] / [X_{ij}^{T_2} - X_{ij}^{T_1}] \quad (2)$$

$$O_{ij} = \langle X^{T_1} \rangle - G_{ij}X_{ij}^{T_1} \quad (3)$$

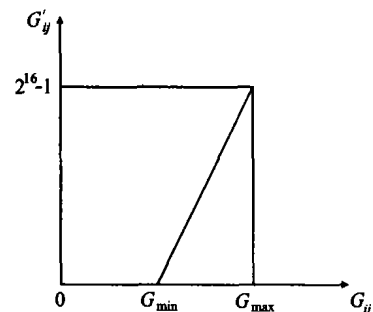
式中 $X_{ij}^{T_1}$ 、 $X_{ij}^{T_2}$ 分别为点 (i, j) 在 T_1 和 T_2 的响应灰度值; $\langle \rangle$ 为对所有有效像元输出的空间平均,即 $\langle \rangle$ 运算不包括响应率极低的死像元和时域噪声严重的过热像元。

校正公式(1)中的系数 G_{ij} 、 O_{ij} 都是浮点数,由于浮点运算在 FPGA 实现,对系统资源以及算法复杂度要求都很高,如果在可以保证一定精度的情况下,将浮点乘加运算转化成定点乘除加运算,则可以方便地利用 FPGA 的定点运算模块来实现。分析校正公式(1)和(2),可以得到如下近似方法:

由于偏移校正系数 O_{ij} 对结果影响不大,直接舍入近似,即:

$$O'_{ij} = \text{round}(O_{ij}) \quad (4)$$

式中 $\text{round}()$ 为取其最相邻整数的运算。而对于增益校正系数 G_{ij} ,由于它与原始灰度值的乘积影响了最后的校正输出,因此这里采用一个尺度变换的方法,把浮点 G_{ij} 线性映射为 16 bit 的定点 G'_{ij} (本系统中采用 16 bit 的定点数来表示,位数越多精度越高,但资源要求也越高)。另外,由于有效光敏元输出与幅照度输入成单调递增关系,容易推出 G_{ij} 非负。变

图3 G_{ij} 与 G'_{ij} 转换关系示意图Fig. 3 Sketch map of the relationship between G_{ij} and G'_{ij}

换方法如图 3 所示。图中的 $G_{\min} = \min(G_{ij})$, 其中 $(i, j) \in$ 有效像元集合, G_{\max} 类似。 $G_{ij} \sim G'_{ij}$ 的线性变换 F 为:

$$F(G_{ij}) = G'_{ij} = \text{round} \left[\frac{2^{16} - 1}{G_{\max} - G_{\min}} (G_{ij} - G_{\min}) \right] \quad (5)$$

由公式(1)、(4)、(5)可得如下近似公式:

$$Y_{ij} \approx G'_{ij}X_{ij} \frac{G_{\max} - G_{\min}}{2^{16} - 1} + G_{\min}X_{ij} + O'_{ij} \quad (6)$$

由公式(2)和 G_{\min} 定义可知 $0 < G_{\min} < 1$, 由公式(6)进一步得到最终的定点校正公式:

$$Y_{ij} \approx G'_v X_{ij} / K_1 + K_2 X_{ij} / 2^{16} + O'_{ij} \quad (7)$$

其中定点系数 K_1 、 K_2 对每个有效像元都是相同的, 具体表达式为:

$$K_1 = \text{round}\left(\frac{2^{16} - 1}{G_{\max} - G_{\min}}\right), K_2 = \text{round}(2^{16} \times G_{\min}) \quad (8)$$

硬件实现时, K_1 用 32 bit 无符号整数表示, 采用 32 bit 表示可以在 $G_{\max} - G_{\min} > 1.526 \times 10^{-5}$ 条件下保证 K_1 不发生上溢, 在 $G_{\max} - G_{\min} < 2^{16} - 1$ 条件下保证 K_1 不发生下溢。 K_2 用 16 bit 无符号整数表示。采用上述变换后, 在保证了足够精度的前提下将浮点运算全部转换成定点运算, 定点校正公式(7)与浮点校正公式(1)相比, 增加了两个全局的定点系数 K_1 、 K_2 , 以及一次定点乘法和一次定点除法。定点系数 K_1 、 K_2 可以存储在 FPGA 内设计的寄存器中, 而定点乘除运算都可以方便调用 Altera 的运算模块实现。最终设计的 FPGA 内部非均匀性校正硬件模块如图 4 所示。

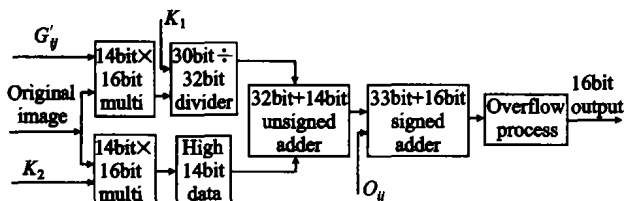


图 4 FPGA 内部非均匀性校正硬件模块框图

Fig. 4 The structure of the NUC process module in FPGA

溢出处理模块主要对运算后超出 $2^{16} - 1$ 或小于 0 的结果进行处理。为尽量提高处理速度, 各处理单元都采用流水线方式, 乘法器采用 4 级流水, 除法器采用 30 级流水, 加法器则采用了 1 级流水, 溢出处理采用 1 级流水。整个流水线深度为 37 级, 最大工作频率可达 100 MHz, 在 100 MHz 下整个流水线填充时间需要 370 ns。在正常运行后, 处理每个像素的时间为 10 ns。具体各处理单元 LE(Logic element)资源需求情况如表 1 所示。

2.2 图像数据帧完整性的保证

对于凝视型红外焦平面成像系统而言, 图像数据帧的完整性是指各像素数据反映的是同一时刻的场景。如果出现图像的上半部分是一帧的内容, 而下半部分是新一帧的内容, 则出现了错帧现象, 即破坏了图像帧的完整性, 必然导致图像处理算法得出错误的

表 1 各处理单元 LE 资源需求情况表

Tab. 1 Logic elements resource demand for each processing unit

Processing unit	Pipeline	LEs
Multi 1 (14 bit×16 bit)	4	474
Multi 2 (14 bit×16 bit)	4	474
Divider(30 bit÷32 bit)	30	3015
Adder1(32 bit+14 bit)	1	30
Adder2(33 bit+16 bit)	1	34
Overflow process (34 bit)	1	20
Total	37	4047

结果。为了保证上传到系统内存的图像帧的完整性, DMA 数据传输必须与 IRFPA 输出图像信号满足一定的时序关系, 即在一帧的时间片中只能在特定的时间范围内进行 DMA 传输。

为了保证这种时序关系, 在软件上的可能解决途径是通过 FPGA 在合适的时刻产生中断信号, 通知 PC 主机应用程序来启动 DMA。但由于操作系统 Win98 不是实时系统, 因此该方法仍无法在根本上保证图像帧的完整性。

从硬件角度考虑, 由于 NUC 卡是 PCI 的目标设备; 利用 FPGA 通过本地总线去控制 PCI 9054 的 DMA 寄存器来启动 DMA, 也会使本地总线接口模块变得非常复杂, 因此最好的解决途径是 PC-104 plus 主机的 CPU 配置好 DMA 操作的各种参数, 包括源地址、目的地址和传输大小等, 然后由处理/接口卡上的 FPGA 根据 IRFPA 输出信号生成的地址信息确定何时开始启动 DMA 传输。

在 PCI 9054 的 C 模式中, DMA 0 通道支持一种 Demand Mode DMA^[3], 在此方式下 CPU 配置了 DMA 操作的各种参数并提交启动 DMA 的请求后, PCI 9054 并不立即启动 DMA 传输, 而是在 DREQ0 # 信号有效后才真正启动 DMA。因此, 在设计上采用 DMA 0 通道的 Demand Mode 进行图像数据的传输。通过 NUC 卡内部的状态机根据用户的请求以及当前输入情况控制 PCI 9054 的 DREQ0 # 引脚, 从而保证通过 DMA 0 通道上传图像数据帧的完整性。

3 结束语

非制冷红外焦平面传感器和采用 PC-104 嵌入

式 PC 的出现,为研制新型便携式红外图像处理系统提供了一种新的解决方案。本设计在 PC-104 的硬件平台上,采用 PCI 9054 和 FPGA 构建了 NUC 卡,实现了一个硬软件功能易于扩展的红外图像处理系统。在该系统基础上,可以根据实际应用要求设计相应的上层软件,构建成红外检测、红外跟踪等各种系统。目前已利用该红外图像处理系统,分别构建了几种红外应用系统。由于采用 PC-104 plus 主机和 Win98 操作系统,使系统具有良好的人机界面,特别适用于需要人机交互的应用。此外,由于开发程序使用的宿主机和最终的目标机兼容,也给开发、调试和维护工作带来很大方便。

考虑到 Win98 对硬件资源有较高要求,同时实时性方面又存在不足,下一步的工作准备用 Window CE 操作系统取代 Win98。

参考文献:

[1] PC/104 Consortium. PC/104-Plus Specification Version 1.1

[M]. PC/104 Consortium, 1997.

[2] PCI Special Interest Group. PCI Local Bus Specification Production Version Revision 2.1 [M]. PCI Special Interest Group, 1995.

[3] PLX Technology Inc. PCI 9054 Data Book Version 2.0 [M]. PLX Technology Inc, 1999.

[4] Scribner D A, Sarkady K A, Caulfield J T, et al. Nonuniformity correction for staring IR focal plane arrays using scene-based techniques [A]. Infrared Detectors and Focal Plane Arrays, SPIE [C]. 1990, 1308, 224-233.

[5] Hardie R C, Hayat M M, Armstrong E, et al. Scene-based nonuniformity correction using video sequences and registration [J]. Applied Optics, 2000, 39(8): 1241-1250.

[6] Milton A F, Barone F R. Influence of nonuniformity on infrared focal plane array performance [J]. Optical Engineering, 1985, 24(5): 855-862.

[7] 陈宝国,郑志伟,黄士科,等. 利用 FPGA 实现红外焦平面器件的非均匀性校正 [J]. 红外与激光工程, 2000, 29(4): 55-57.

[8] 王钰,陈钱,殷德奎,等. 实时红外图像非均匀性校正技术研究 [J]. 红外与毫米波学报, 1999, 18(2): 151-155.

(上接第 495 页)

该图说明两个问题:

(1) 目标的像素值是随距离变化的,目标的像素值在 30 帧采样时间内增加了 50 bit,如图 8 所示;

(2) 像素值增加较快,目标可能是来袭导弹。

4 结 论

本文研究的空间滤波器可以在多种复杂背景图像中探测到点目标信号。当信背比大于 1.1 时,在所用空间滤波器通常可探测到试验图像中惟一的点目标,该目标可能是静止目标、来袭目标或远去的目标,通过进一步采用基于像素灰度值变化检测的时间滤波器可以判断该目标是否是来袭目标。该方法适于对反舰导弹的探测,因为通常情况下反舰导弹的来袭方向总是与红外成像系统的光轴重合或近似重合,使得点目标的位置在图像中基本不变。

点目标在很远时,大气的扰动使得探测到的点目标的辐射强度存在起伏,即“闪烁”现象。但目标辐射强度的变化趋势是增强的。在进一步的研究中,将同时利用点目标信号变化检测和闪烁检测^[6]来进行时

间滤波。

参考文献:

[1] De Jong A.IRST and its Perspective [A]. Proceeding of SPIE on Infrared Technology XXI [C]. 1995, 2552, 206-213.

[2] Reed IS, Gagliardi R M, Stotts L B. A recursive moving-target-indication algorithm for optical image sequences [J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 1990, 26(3): 434-440.

[3] Zhu Z, Liang H, Pan A, et al. Detection and acquisition of small targets with low signal-to-clutter ratio [A]. Proceeding of SPIE on Signal and Data Processing of Small Targets [C]. 1999, 3809, 564-569.

[4] 熊辉,沈振康. 低信噪比抖动红外点目标的检测 [J]. 国防科技大学学报, 1998, 20(2): 54-59.

[5] Burke Hubbard B. The world according to wavelets [M]. Wellesley, MA: AK Peters, Ltd, 1995.

[6] De Jong AN, Winkel H, Kemp RAW. Encountering bird alarms in full-stare IRSTs [A]. Proceeding of SPIE on Infrared Technology and Applications XXVI [C]. 2000, 4130, 700-709.